

©1994 г.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ДИАГНОСТИКА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ p - n -ПЕРЕХОДОВ В КРЕМНИИ

*А.Н.Андронов, Н.Т.Баграев, Е.Л.Клячкин, С.В.Робозеров,
Н.С.Фараджев*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 24 июня 1994 г. Принята к печати 29 июня 1994 г.)

Для изучения квантово-размерных p^+ - n -переходов в кремнии, полученных в условиях неравновесной диффузии, использовано зондирование приповерхностной области электронами малых и средних энергий. Исследована энергетическая зависимость коэффициента радиационной проводимости в образцах, различающихся глубиной диффузионного профиля и уровнем легирования. На основании экспериментальных данных определено распределение по глубине кристалла вероятности разделения электронно-дырочных пар полем p - n -перехода. Для диодных структур, полученных при доминировании либо kick-out, либо диссоциативного вакансионного механизма примесной диффузии, обнаружен энергетический порог появления наведенного тока, свидетельствующий о том, что возбужденные вблизи границы диффузионного профиля неравновесные носители не участвуют в создании тока во внешней цепи. Показано, что наиболее вероятной причиной этого эффекта является наличие в указанной области вторичных дефектов, ответственных за рекомбинацию возбужденных носителей и перераспределение электрического поля.

Квантово-размерные приборные структуры на основе гетеропереходов, квантовых ям и сверхрешеток обладают рядом уникальных характеристик и являются объектом многочисленных исследований. В последнее время появился еще один класс подобных структур — сверхрезкие диффузионные профили с высокой концентрацией примеси и малой глубиной залегания, полученные в условиях неравновесной диффузии [1-4]. Возможности подобных приповерхностных диодных и транзисторных структур еще до конца не выяснены, однако уже сейчас ясно, что на их основе можно создавать эффективные детекторы ультрафиолетового излучения [2] и заряженных частиц [5], а также источники мощного ИК излучения [6]. Кроме того, наличие вырожденного двумерного газа электронов или дырок в области квантово-размерных p - n -переходов приводит к появлению новых эффектов, связанных с

№ образца	d_{SiO_2}/d_0	T диффузии, °С	Подложка	
			Удельное сопротивление, Ом·см	Ориентация
1.	0.31	900	500	(100)
2.	1.28	800	500	(100)
3.	1.28	900	5	(111)
4.	0.68	900	20	(100)
5.	1.28	1100	500	(100)

туннелированием носителей [7] и зарядовыми корреляциями [6], что позволяет использовать эти структуры в качестве модельных объектов для изучения свойств низкоразмерных систем.

Принципы получения сверхрезких профилей основны на том, что скорость диффузии легирующей примеси и ее концентрацию можно менять в очень широких пределах, регулируя поток собственных дефектов (межузельных атомов или вакансий), генерируемых окисленной поверхностью кремния [1-4]. Повышенное содержание таких дефектов вблизи диффузионного фронта может, однако, привести и к нежелательному накоплению в приповерхностной области устойчивых нарушений кристаллической структуры, способных изменить характеристики $p-n$ -перехода [8]. Для того чтобы выяснить, как свойства этой области зависят от конфигурации диффузионного профиля и способа его получения, в настоящей работе проводилось электронно-лучевое зондирование p^+-n -переходов, изготовленных при различной температуре и толщине окисла.

На начальной стадии создания p^+-n -перехода пластины монокристаллического кремния n -типа подвергались термическому окислению, после чего на рабочей стороне с помощью фотолитографии вскрывались окна, в которые проводилась диффузия бора из газовой фазы. Затем по периметру окон и с обратной стороны пластины формировались омические контакты.

Глубина диффузионного профиля и концентрация бора в нем определялись толщиной окисла (d_{SiO_2}) и температурой диффузии. Если толщина оксидного слоя меньше критической толщины d_0 [2-4], при которой происходит смена типа собственных дефектов, генерируемых окисленной поверхностью, то при высокой температуре диффузия проходит в условиях избыточных потоков собственных междузельных атомов. Напротив, при $d_{\text{SiO}_2} > d_0$ и низких температурах на границе раздела Si-SiO₂ преимущественно генерируются избыточные вакансии. В случае паритетной толщины окисла ($d_{\text{SiO}_2}/d_0 \simeq 1$) и промежуточных температур диффузии (900-1000 °С) наблюдается интенсивная аннигиляция вакансий и междузельных атомов в кремнии, что приводит к резкому торможению диффузии [1-4]. Кроме того, в случае наличия окисла на обратной стороне пластины в образце возникают встречные потоки точечных дефектов, также оказывающие тормозящее воздействие на диффузию примеси. Конкретные условия изготовления ис-

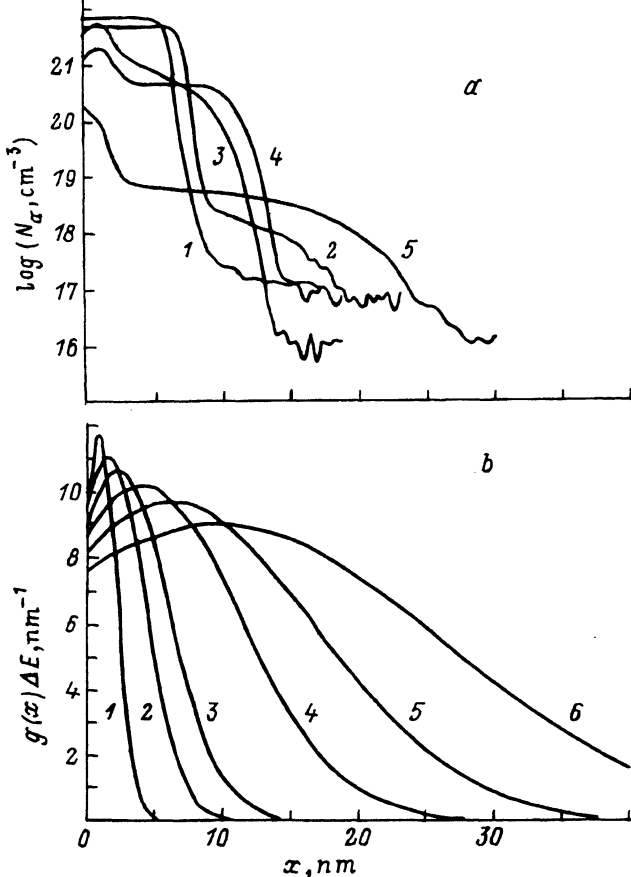


Рис. 1. *a* — диффузионные профили бора в кремнии, полученные методом SIMS; цифры соответствуют номерам образцов в таблице. *b* — пространственное распределение плотности генерации электронно-дырочных пар в кремнии, E_1 (кэВ): 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.3, 4 — 0.5, 5 — 0.7, 6 — 1.0.

следованных структур отражены в таблице, а профили распределения бора в них, измеренные методом масс-спектрометрии вторичных ионов SIMS, приведены на рис. 1, *a*.

Диагностика приповерхностной области этих образцов проводилась в сверхвысоковакуумной камере, в которой при различных энергиях первичных электронов E_1 измерялся коэффициент радиационной (наведенной) проводимости γ через обратно смещенный p - n -переход. Ввиду малой глубины залегания профилей (7.5–22 нм), для этой цели использовались электроны с $E_1 = 0.05$ –3.5 кэВ, максимальная глубина проникновения которых в кремний лежит в пределах от 2 до 240 нм [9]. В качестве примера на рис. 1, *b* показано, как изменяется с энергией электронов распределение генерации электронно-дырочных пар в кремнии по глубине образца. При расчете этих зависимостей одномерная гирационная функция $g(E_1, x) = -dE_1/dx$ аппроксимировалась гауссианой по методике, предложенной в работе [9].

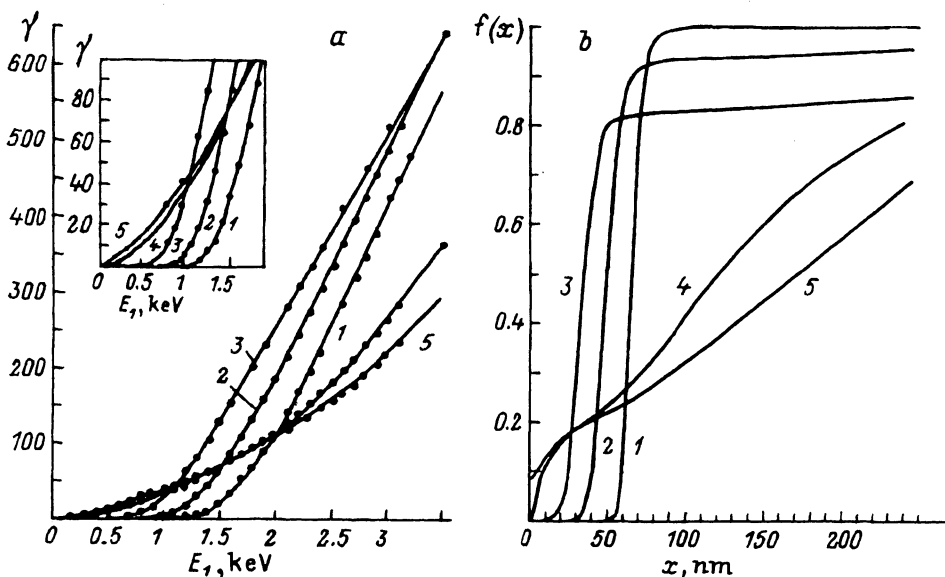


Рис. 2. Энергетические зависимости коэффициента радиационной проводимости (а) и рассчитанные по ним функции собирания p - n -перехода (б); сплошные линии — расчет, точки — эксперимент; цифры соответствуют номерам образцов в таблице. На врезке приведены начальные участки зависимости $\gamma(E_1)$ в укрупненном масштабе.

Для того чтобы отделить наведенный ток от темнового, измерения проводились при синусоидальной модуляции первичного потока электронов с частотой 1 кГц. Контрольные измерения на постоянном токе во всех случаях давали те же значения коэффициента радиационной проводимости. Этот коэффициент не менялся при изменении первичного тока от 0.01 до 50 мкА и практически не зависел от обратного смещения на структуре. На рис. 2,а представлены полученные описанным способом экспериментальные зависимости $\gamma(E_1)$ для всех участвовавших образцов. На основании этих зависимостей можно оценить свойства области, непосредственно примыкающей к границе диффузионного профиля, если воспользоваться соотношением

$$\gamma(E_1) = \int_0^{\infty} \frac{g(E_1, x)}{\Delta E} f(x) dx, \quad (1)$$

где ΔE — средняя энергия, затрачиваемая на образование одной электронно-дырочной пары; $f(x)$ — функция собирания p - n -перехода [10], показывающая, какая доля возбужденных на данной глубине x электронно-дырочных пар примет участие в создании тока во внешней цепи. Рассматривая это выражение как интегральное уравнение Фредгольма первого рода, можно по известной зависимости $\gamma(E_1)$ найти функцию собирания $f(x)$.

Приближенное численное решение уравнения (1) находилось с помощью регуляризирующих алгоритмов, разработанных в теории некорректных задач [11]. Для получения устойчивых решений на искомую

функцию накладывались априорные ограничения — она считалась неотрицательной, ограниченной и монотонной во всей области существования. На рис. 2, *b* приведены функции собирания для различных образцов, рассчитанные таким способом по экспериментальным данным рис. 2, *a*. Правильность полученных решений проверялась путем их подстановки в выражение (1) и вычисления коэффициента радиационной проводимости при различных E_1 . Результаты этих расчетов, показанные на рис. 2, *a* сплошными линиями, хорошо согласуются с экспериментальными зависимостями во всем диапазоне энергий.

Функция собирания, по определению, является интегральным параметром структуры, который полностью определяет ее реакцию на внешнее ионизирующее излучение и учитывает процессы переноса и рекомбинации возбужденных носителей. В случае облучения электронами средних энергий, в отличие от оптических методов возбуждения [10], основная генерация носителей происходит непосредственно в области пространственного заряда p - n -перехода (рис. 1, *b*). Поведение функции собирания в этой области отражает условия разделения электронно-дырочных пар полем перехода и определяется прежде всего временем жизни неравновесных носителей и распределением электрического поля. Таким образом, если $f(x)$ имеет ступенчатую форму, характерную для порогового вида зависимости $\gamma(E_1)$ (рис. 2), то в приповерхностной области должен существовать слой, возбужденные в котором электронно-дырочные пары не участвуют в формировании тока радиационной проводимости либо по причине крайне малого времени жизни, либо из-за наличия потенциального барьера.

Подобное поведение наиболее ярко проявляется у образцов, полученных при явном доминировании одного из двух упоминавшихся ранее механизмов неравновесной диффузии, т.е. при резком ускорении диффузии в результате увлечения примесных атомов мощным потоком вакансий (образцы 2 и 3) или собственных межузельных атомов (образец 1), генерируемых на границе раздела Si-SiO₂. Такие условия стимулируют накопление в области, примыкающей к границе диффузионного профиля, устойчивых вторичных дефектов, природа которых зависит от режима изготовления структуры. В случае диссоциативного вакансионного механизма при охлаждении пластин наиболее вероятно образование мелких вакансионных кластеров, находящихся в режиме мотт-хаббардовского диэлектрика [12]. При ускорении диффузии потоком собственных межузельных атомов (kick-out механизм) в кремнии возникают двойные доноры, являющиеся эффективными центрами рекомбинации и представляющие собой реконструированные междоузлия [12,13]. Последние в значительно большей степени уменьшают время жизни неравновесных носителей в кремнии n -типа, чем амфотерные вакансионные кластеры [12,13]. Кроме того, при достаточно высокой концентрации дефектов вблизи диффузионного фронта оба типа дефектов могут повлиять на распределение потенциала в области пространственного заряда p - n -перехода и привести к возникновению потенциальной ямы, препятствующей разделению электронов и дырок (рис. 3).

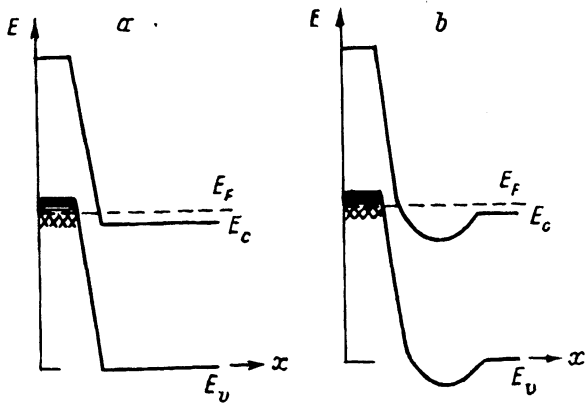


Рис. 3. Одноэлектронная зонная схема квантово-размерного p - n -перехода при сравнительно низкой (а) и высокой (б) концентрации вторичных дефектов вблизи границы диффузионного профиля.

Как следует из рис. 2, б, обсуждаемый «мертвый слой», в пределах которого $f(x) \simeq 0$, имеет сравнительно резкую границу, положение которой зависит от условий изготовления структуры. Наибольшая толщина этого слоя наблюдается в образце с диффузионным профилем, полученном при доминировании механизма kick-out, поскольку в этом случае неравновесные носители не только рассеиваются, но и рекомбинируют в области потенциальной ямы. За пределами мертвого слоя функция сбора отлична от единицы, если условия диффузии не удовлетворяют оптимальному геттерированию остаточных точечных дефектов, которые снижают время жизни неравновесных носителей в n -области [4,8].

При паритете kick-out и диссоциативного вакансионного механизмов (образы 4 и 5) концентрация вторичных дефектов вблизи квантово-размерного диффузионного профиля резко снижается и потенциальная яма в этой области вообще не возникает (рис. 3, а), что стимулирует радиационную проводимость уже при самых малых энергиях электронов (рис. 2, а). Данный случай, однако, соответствует наиболее неблагоприятным условиям геттерирования [4,8], в результате чего концентрация центров рекомбинации в объеме n -области у образцов 4 и 5 существенно выше, чем у образцов 1-3 (рис. 2, б).

Таким образом, предложенная методика электронно-лучевой диагностики открывает значительные возможности по изучению взаимной связи характеристик диффузионных профилей и электрофизических свойств квантово-размерных p - n -переходов. Это позволило обнаружить и объяснить пороговый характер энергетической зависимости коэффициента радиационной проводимости для образцов, полученных при явном доминировании либо kick-out, либо диссоциативного вакансионного механизма неравновесной примесной диффузии, который обусловлен повышенной концентрацией вторичных дефектов вблизи диффузионного фронта.

Авторы выражают признательность В.Л. Суханову и Н.В. Забродской за большую помощь в подготовке экспериментальных образцов.

Список литературы

- [1] Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, В.Л. Суханов. Письма в ЖТФ, **17**, 42 (1991).
- [2] N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, V.L. Sukhanov. Semicond. Sci. Technol., **6**, 577 (1991).
- [3] N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, V.L. Sukhanov. Def. Diffusion Forum. **103-105**, 192 (1993).
- [4] N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, V.L. Sukhanov. Sol. St. Electron., **34**, 1149 (1991).
- [5] Е.М. Вербицкая, В.К. Еремин, А.М. Маляренко, Н.Б. Строкан, В.Л. Суханов, Б. Шмидт, Дж. фон Борани. ФТП, **27**, 2055 (1993).
- [6] Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, Е.И. Чайкина. Письма в ЖЭТФ, **58**, 620 (1993).
- [7] Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, В.Л. Суханов. Письма в ФТП, **25**, 1613 (1991).
- [8] Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, И.С. Половцев, В.Л. Суханов. Письма в ФТП, **24**, 1557 (1990).
- [9] В.В. Макаров. ЖТФ, **48**, 551 (1978).
- [10] Е.Н. Пятышев, Д.В. Кузичев. Измер. техника, **9**, 3 (1991).
- [11] А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский и др. *Численные методы решения некорректных задач* (М., Наука, 1990).
- [12] N.T. Bagraev, I.S. Polovtsev, K. Schmalz. Phys. St. Sol. (a), **113**, 233 (1989).
- [13] N.T. Bagraev, S.N. Gorin, V.V. Vysotskaya, Yu.A. Sidorov. J. Phys. (France) III, **1**, 733 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев
